

内蒙古锡林郭勒盟资源环境承载力 RF-BP 模型情景模拟研究

图娜拉¹ 吴全² 敖登高娃¹

1 内蒙古师范大学地理科学学院

2 内蒙古自治区国土空间规划院

DOI:10.32629/eep.v9i3.3127

[摘要] 为科学评估草原化地区资源环境承载力与可持续发展水平,本文以锡林郭勒盟为研究区,构建资源-环境-社会经济三维评价指标体系。基于2000-2023年面板数据,融合变异系数法、综合指数法,建立随机森林(RF)与BP神经网络组合模型,设置惯性发展、经济优先、生态优先、协调发展4种情景,模拟2024-2050年资源环境承载力演变趋势。结果表明:(1)2000-2023年研究区综合承载力呈波动上升态势;(2)RF-BP组合模型拟合精度高、非线性模拟能力突出,优于单一模型;(3)4种情景中,协调发展情景综合表现最优,可实现经济、生态、社会协同增效,最契合草原化地区发展需求。研究结果可为区域可持续发展战略制定提供决策支撑。

[关键词] 资源环境承载力; 锡林郭勒盟; RF-BP组合模型; 情景模拟; 草原化地区

中图分类号: S342.3 文献标识码: A

Scenario Simulation Study on Resource and Environmental Carrying Capacity RF-BP Model in Xilin Gol League, Inner Mongolia

Nala Tu¹ Quan Wu² Denggaowa Ao¹

1 School of Geography, Inner Mongolia Normal University

2 Inner Mongolia Autonomous Region Institute of Territorial Space Planning

[Abstract] To scientifically assess the resource-environment carrying capacity and sustainable development level of grassland areas, this paper takes Xilingol League as the study area and constructs a three-dimensional evaluation index system of resources, environment and socio-economy. Based on panel data from 2000 to 2023, a combined model of Random Forest (RF) and BP neural network is established by integrating the coefficient of variation method and the comprehensive index method. Four scenarios, namely inertial development, economic priority, ecological priority and coordinated development, are set to simulate the evolution trend of resource-environment carrying capacity from 2024 to 2050. The results show that: (1) The comprehensive carrying capacity of the study area fluctuated and increased from 2000 to 2023; (2) The RF-BP combined model has high fitting accuracy and outstanding nonlinear simulation capability, superior to single models; (3) Among the four scenarios, coordinated development performs best, achieving synergistic growth of economy, ecology and society, which best meets the development needs of grassland areas. The results can provide decision support for formulating regional sustainable development strategies.

[Key words] Resource and environmental carrying capacity; Xilin Gol League; RF-BP combination model; Scenario simulation; Grasslandification areas

在全球气候变化与人类活动影响下,区域资源环境系统可持续性已成为社会发展的重要制约。资源环境承载力作为衡量生态系统承载阈值的关键指标,能为可持续发展规划与生态安全预警提供科学支撑^[1]。锡林郭勒盟是我国北方重要生态屏障与能源基地,草原生态脆弱,在矿产开发、城镇化及畜牧业发展等压力下,资源环境负荷加剧,草地承载力下降,局部出现生态赤字,开展高精度承载力预测研究十分必要^[2]。

目前国内外相关研究体系较为完善,但传统模型多为静态评估,存在线性假设等局限。机器学习虽能改善这一问题,但单一模型仍有不足,而混合模型应用相对有限。本研究构建RF-BP组合模型,模拟锡林郭勒盟资源环境承载力演变,识别驱动因素,优化模型并开展多情景预测,为草原地区资源环境管理与可持续发展提供理论与技术支持。

1 材料与数据

1.1 研究区域概况

锡林郭勒盟位于内蒙古中部,地理坐标为北纬 $42^{\circ} 32' -46^{\circ} 41'$ 、东经 $111^{\circ} 59' -120^{\circ} 00'$,辖2市9旗1管理区,总面积 20.3 万 km^2 ,草原面积占比 87.12% ,是典型温带大陆性气候,降水稀少、蒸发强烈,天然草原分为草甸草原、典型草原等五大类型。区域煤炭、石油等矿产资源丰富,能源化工产业发展迅速,2023年三次产业结构为 $14.8:51.8:33.3$,呈“二—三—一”格局。特殊的区位条件、脆弱的生态本底与资源型产业结构,导致区域资源开发与生态保护矛盾突出。

1.2 数据来源与预处理

研究采用2000—2023年面板数据,数据来源包括国土变更调查、地理空间数据云、NASA-EARTHDATA、国家青藏高原科学数据中心、《内蒙古水资源公报》、各级统计年鉴等权威平台。

数据预处理分为三步:一是极差标准化处理^[3],消除各指标量纲差异及正负影响,为指标赋权奠定基础;二是变异系数法^[4]客观赋值指标权重,规避主观赋权随意性,提升评价科学性;三是线性加权求和^[5],结合无量纲化指标与权重,计算资源环境承载力综合值。

1.3 评价指标体系构建

遵循科学性、系统性、可操作性原则,借鉴相关研究^[6],结合锡林郭勒盟生态脆弱、畜牧与矿业主导的特征,基于“资源—环境—社会经济”框架,构建3个子系统、7个标准层、19个指标的评价体系,资源子系统含土地、水、矿产资源,指标有人均草地、林地、水资源量等;环境子系统含生态、大气环境,指标有土壤风蚀模数、草原植被覆盖度等;社会经济子系统含社会、经济条件,指标有人口密度、人均GDP等,各指标均明确属性与权重,核心反映区域畜载压力、矿业扰动、生态脆弱性及社会经济支撑能力。

1.4 构建RF-BP组合模型

模型构建流程包含数据预处理、RF特征选择、RF-BP模型构建、训练验证及精度评价,数据集按7:3划分为训练集与测试集,时间步长1年,预测时段为2024—2050年。

1.4.1 RF特征选择

以19项指标为输入、资源环境承载力为输出,基于MATLAB构建随机森林回归模型,优化决策树数量与节点分裂特征^[7],依据节点纯度筛选人均草地面积、原煤探明储量、土壤风蚀模数、草原放牧强度、草原净初级生产力、森林覆盖率、二氧化碳排放量、人口密度、城镇化率、人均GDP、农牧区常住居民人均可支配收入以及单位GDP能耗等12个关键指标。

1.4.2 RF-BP组合模型构建

以筛选的12个关键变量为输入,资源环境承载力为输出,构建单隐含层BP神经网络,依据经验公式 $\sqrt{a+b+e}$ ^[8]确定隐含层神经元数为7,设定最大迭代次数1000次、学习速率0.01,优化激活函数。

1.4.3 模型精度评价

采用均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误

差(MRE)和决定系数(R^2)四类指标验证模型精度,对比单一RF模型、BP模型与RF-BP组合模型的预测性能。

1.5 情景设定

基于筛选的12个关键指标历史复合年均增长率(CAGR),设置惯性发展、经济优先、生态优先、协调发展四种情景,预测2024—2050年锡林郭勒盟资源环境承载力。

各情景设定如下:惯性发展情景延续历史CAGR,作为参照;经济优先情景侧重经济增长,提高人均GDP、居民收入及城镇化增速,加快原煤消耗与放牧强度,放缓能效改善,降低森林覆盖率增速;生态优先情景聚焦生态修复,大幅提升森林覆盖率和草原净初级生产力,扭转风蚀、放牧及碳排放恶化趋势,放缓经济增速,强化能效改善,限制原煤消耗;协调发展情景兼顾生态与经济,参数介于两者之间,推动产业优化,实现三大效益统一。

2 结果与分析

2.1 资源环境承载力时序分析

2000—2023年,锡林郭勒盟资源环境承载力整体呈波动上升态势,评价值从0.0980升至0.2052,承载能力稳步提升。其中,资源子系统承载力波动上升,前期因利用效率低而水平不高,后期随技术进步、管理优化及保护措施推进,承载力显著提升;环境子系统承载力总体上升但有波动,初期受过度放牧、矿产开采影响而偏低,2011年后随生态保护政策落地,改善效果凸显;社会经济子系统承载力持续显著上升,评价值从0.0638升至0.2639,经济发展与社会福利提升是核心驱动力,2015年后因民生投入加大,承载力实现大幅跃升。

2.2 模型预测精度分析

为凸显RF-BP模型性能,将其与单一RF、BP模型对比,测试集相对误差显示,RF模型误差波动大、BP模型次之,而RF-BP模型误差稳定且最低,长期预测性能更优。采用RMSE、MAE、MRE和 R^2 评估发现,RF模型表现最差,优化后的RF-BP组合模型误差显著更优,MRE仅 1.22% 、 R^2 达 0.97628 ,拟合度与准确性高,可用于锡林郭勒盟资源环境承载力预测。

2.3 资源环境承载力情景模拟分析

基于RF-BP模型预测,2024—2050年锡林郭勒盟四种发展情景下资源环境承载力差异明显,综合水平由高到低为:协调发展>经济优先>惯性发展>生态优先。协调发展模式统筹经济、生态与社会发展,可实现资源优化配置,承载力提升效果最佳,更契合草原地区发展需求。

资源子系统在各情景中均呈上升态势,生态优先情景增幅最大,惯性发展情景最小。前者注重草地保护与资源节制开发,后者延续原有发展模式,保护与开发失衡,制约提升速度。环境子系统中,生态优先与协调发展情景稳步上升,通过降低放牧强度、治理风蚀、提高植被覆盖率等措施改善生态;经济优先与惯性发展情景因保护不足,生态压力加大,承载力持续下降。社会经济子系统整体呈上升趋势,协调发展情景增幅与最终水平最高,生态优先情景因适度调控经济发展速度,城镇化、人均GDP等指标提升较慢,承载力增幅相对滞后。

2.4 模型普适性验证

为验证模型在草原化地区资源环境承载力研究中的适用性,选取内蒙古东、中、西部不同草原化地区开展多情景预测,结果均表明协调发展情景为各区域最优选择,与核心研究结论相符,充分验证了该模型在草原化地区研究中的广泛适用性。

资源型城市鄂尔多斯情景排序为协调发展>惯性发展>生态优先>经济优先,协调发展兼顾资源开发与生态约束,承载力提升最快。呼伦贝尔生态本底优良,情景排序相同,协调发展可在保护生态基础上发展绿色产业,各情景均稳步上升。乌兰察布生态脆弱,排序一致,经济优先初期易引发生态压力与承载力波动,后期逐步恢复;协调发展则可避免波动,实现稳步提升。

3 结论

本研究运用变异系数法、综合指数法及RF-BP组合模型,对内蒙古锡林郭勒盟资源环境承载力开展历史评估与未来情景模拟。2000-2023年,研究区综合承载力及资源、生态环境、社会经济子系统承载力均呈波动上升趋势。资源子系统因利用效率提高与管理加强稳步提升,生态环境子系统在保护措施下逐步恢复,社会经济子系统随发展水平与民生改善持续提升承载能力。经检验,优化后的RF-BP组合模型精度大幅提升,平均相对误差仅1.22%,可有效拟合历史数据,揭示驱动因子与承载力的非线性关系,预测效果良好。2024-2050年多情景模拟显示,承载力排序为协调发展>经济优先>惯性发展>生态优先,协调发展模式可实现经济、生态与社会协同提升,符合草原地区可持续发展要求。将模型应用于内蒙古东、中、西部草原区域验证,同样表明协调发展情景承载力最优,证明该模型在草原化地区资源

环境承载力研究中具有较强适用性与可靠性。

[参考文献]

- [1]于贵瑞,张雪梅,赵东升.区域资源环境承载力科学概念及其生态学基础的讨论[J].应用生态学报,2022,33(3):577-590.
- [2]马梅,张圣微.锡林郭勒草原近30年草地退化的变化特征及其驱动因素分析[J].中国草地学报,2017,39(4):86-93.
- [3]叶宗裕.关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择[J].浙江统计,2003,(04):25-26.
- [4]石宝峰,程砚秋,王静.变异系数加权的组合赋权模型及科技评价实证[J].科研管理,2016,37(05):122-131.
- [5]郑雅,李蕊蕊.资源环境承载力评价研究——以安徽省泗县为例[J].淮阴工学院学报,2019,28(01):56-60.
- [6]骆毓燕,向平平.基于GMD-GRA-TOPSIS的成渝城市群资源环境承载力评价[J].环境科学与技术,2024,47(9):178-186.
- [7]钟登华,沈子洋,王佳俊,等.基于实时监控的混凝土坝坝体施工质量动态评价研究[J].水利学报,2018,49(07):775-786.
- [8]王嵘冰,徐红艳,李波,等.BP神经网络隐含层节点数确定方法研究[J].计算机技术与发展,2018,28(4):31-35.

作者简介:

图娜拉(2000--),女,内蒙古锡林郭勒盟人,硕士研究生,研究方向:土地资源可持续利用与评价。

吴全(1964--),男,内蒙古赤峰人,正高级工程师,教授,研究方向:国土空间规划与水土资源优化利用研究。

教登高娃(1969--),女,内蒙古乌拉特前旗人,副教授,博士,研究方向:土地资源可持续利用。